月面冯·卡门撞击坑的着陆选址和科学探测目标浅析

孟治国^{1,2,3,4},李翠¹,平劲松⁴,黄倩⁵,蔡占川³, Alexander Gusev⁶

(1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院,长春 130026; 2. 中国科学院 遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室,北京 100101;
3. 澳门科技大学 月球与行星科学实验室,澳门 999078; 4. 中国科学院 国家天文台 月球与深空探测重点实验室,北京 100012;
5. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院 地球内部多尺度成像湖北省重点实验室,武汉 430074;

6. 喀山联邦大学 地质研究所,俄罗斯 喀山 420008)

摘 要: 冯·卡门(Von Kármán)撞击坑位于月球背面南极--艾肯(South Pole-Aitken, SPA)盆地中部,是中国"嫦娥 4号"计划的优先级较高的探测目标。对该撞击坑的着陆和探测,有助于揭示月球形成和演化的一些关键问题,在月球科学 研究中具有重大的意义。论文概要总结了冯·卡门撞击坑的研究意义和科学价值;结合LRO卫星LOLA数据、Clementine UV-VIS数据、GRAIL数据、"嫦娥2号"卫星CELMS等数据,简要分析了冯·卡门撞击坑的地形、成分、深部结构和亮温分 布等特征及其科学意义;结合这些研究成果和前人对冯·卡门撞击坑的研究期望,提出了3个预选着陆区和可能的科学发现。

关键词:嫦娥4号;冯·卡门撞击坑;着陆区选择;科学重要性

中图分类号: P184 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2018)01-0003-09 **DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2018.01.001

引用格式: 孟治国,李翠,平劲松,等.对月面冯·卡门撞击坑的着陆选址和科学探测目标浅析[J]. 深空探测学报,2018,5(1):3-11.

Reference format: MENG Z G, LI C, PING J S, et al. Analysis about landing site selection and prospective scientific objectives of the Von Kármán crater in Moon farside[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5 (1) : 3-11.

0 引 言

月球背面南极-艾肯(South Pole-Aitken, SPA) 盆地内的冯·卡门撞击坑,是预定于2018年后在月球背 面开展探测的"嫦娥4号"着陆和巡视任务的优先级较高 的候选着陆区,这将是人类首次在月球背面的软着陆 和巡视勘察,在月球科学探测领域具有极为重要的历 史和现实意义^[1]。

SPA的纬度位于40°S~60°S,中心经度位于180°附近,直径达2 600 km,是太阳系中规模最大、最古老的撞击盆地^[2-3]。有关SPA盆地的物质成分分布以及盆地的形成和演化一直以来都是科学界研究的热点和争论的焦点^[4-7]。基于Clementine、Kaguya和Chandrayaan Moon Mineralogy Mapper (M³)等数据的观测,在SPA大盆地中还发现一些小范围分布的橄榄石、斜长石、尖晶石和非月海的高钙辉石^[8-12]。根据地形和成分数据,SPA盆地明显有别于月表其它地区,是月球上可识别的最古老的表面撞击结构^[13-14]。美国国家研究理事会为重返月球的星座计划提出了35个科学目标,Snape

等认为,这些目标几乎可以全部通过探测SPA盆地实现,并将冯·卡门撞击坑列为预探测的重要目标之一^[15]。

冯·卡门撞击坑位于SPA盆地的中部(42°S~48°S/ 172°E~180°E),中心坐标为(44.8°S,175.9°E), 直径约为180 km,提供了一个近距离了解SPA盆地撞 击过程、撞击历史以及成分构造的机会。冯·卡门是一 个前酒海纪撞击坑,在中部存在一个小的中央隆起^[15]; 内部填充了雨海纪玄武岩,年龄约为3.35 Ga(图1)^[16]。 冯·卡门撞击坑北部是莱布尼兹(Leibnitz)撞击坑,东 北部是梵森(Finsen)撞击坑,东南部是阿尔德(Alder) 撞击坑。相对来看,冯·卡门撞击坑地形平坦,适合探 测器的着陆,且出现了较新的玄武岩^[7]。因此,冯·卡 门撞击坑是最有可能挖掘出下月壳和月幔物质的区 域,对其探测研究有望填补深层月壳及上月幔研究的 空白,取得对月球早期演化历史的新认识^[17]。

但是,目前该区域依然缺乏系统性、综合性的研 究。因此,本文利用最新的影像、光谱、高程、重力 和微波数据,对冯·卡门撞击坑的地形地貌、成分特

基金项目:国家自然科学基金(41371332,11403020);遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201706)

收稿日期: 2017-11-08 修回日期: 2017-12-06

征、地壳结构和微波热辐射特性等进行了详细的研 究,以期为"嫦娥4号"的着陆探测提供科学的参考。



图 1 "嫦娥4号"预选着陆区冯·卡门区域影像图 Fig. 1 Image of the Von Kármán crater, CE-4 candidate landing site

1 冯·卡门撞击坑的研究意义和价值

深部月壳和月幔成分是当今月球科学研究的关键 问题之一,对于我们了解月球形成初期的分异作用, 探究月球的二分性(即月球正面和背面的地形地貌、 结构、物质成分、月壳厚度的分布等具有的明显差 异)的成因具有重要意义^[18]。但是,目前尚无法通过 遥感手段直接获得准确的深部月壳和月幔的成分,也 未采集到月球深部的岩石样品。而冯·卡门撞击坑的着 陆和巡视勘察将为解决这一问题提供重要实测资料。

肖龙等认为,SPA盆地是最有可能挖掘出月幔物 质的盆地,其峰环、盆地内以及溅射毯的撞击熔融层 及撞击熔融角砾岩都是很好的月幔物质取样区。虽然 挖掘出的月幔物质可能被月壤及玄武岩覆盖,但后期 形成的撞击坑又可重新将较新鲜的月幔物质暴露出来^{II7}。 因此,SPA盆地是探测和研究深部月壳及月幔物质的 理想区域^{II7}。

研究中,肖龙等建议将智海(Ingenii Basin)和阿 波罗盆地(Apollo Basin)作为着陆选择区。智海盆地 是位于SPA盆地西北边缘的一个前酒海纪多环撞击盆 地,中心位置(33.7°S,163.5°E)。直径约为880 km。 该区域可以获得的科学发现包括:月球背面年轻的火 山活动产物,熔岩管塌陷暴露的地下结构,较纯的高 地斜长岩,旋涡状结构的成因等^[17];月震探测可获得 背面的月壳结构等^[19]。

阿波罗盆地的中心位于(35.7°S,208.5°E), 是一个直径约为480 km的前酒海纪多环盆地,位于 SPA盆地东北边缘以内。可获得的科学发现包括:峰 环或坑壁以及溅射物中可能暴露下月壳甚至月幔的物质; 检测高钛和高铝两个月海岩石单元; 原始斜长岩月 壳、克里普岩等行星分异产物的信息; 存在火山碎屑岩, 对月球的火山活动和热状态的研究有指导意义^[17]。

这些都表明,对SPA盆地的着陆研究具有十分重要的科学价值。冯·卡门撞击坑位于SPA盆地的中部,中心坐标为(44.8°S,175.9°E),直径为172 km。图2为冯·卡门区域的地质图,Im:暗色玄武岩平原物质;Ig:覆盖有撞击坑的沟槽和山丘;Nc:比雨海Imbrium撞击坑老比酒海Nectaris撞击坑年轻的地质单元^[13],该图来源于美国地质调查局(U.S. Geological Survey)

(https://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/usgs/), 截取范围为(170°E~190°E,30°S~50°S)。可以看 出,冯·卡门南部玄武岩覆盖区年龄为雨海纪。冯· 卡门重复撞击到一个年龄稍老的冯·卡门M撞击坑上, 该撞击坑很有可能穿透了整个SPA盆地月壳,并挖掘 出了部分月幔物质。这组撞击坑所处的区域是月球背 面SPA区域富含钍元素和KREEP岩的区域^[7]。因此,冯· 卡门撞击坑的峰环、坑内以及溅射毯的撞击熔融层及 撞击熔融角砾岩都是很好的月幔物质取样区。虽然挖 掘出的月幔物质可能被月壤及玄武岩覆盖,但后期形 成的撞击坑又可重新将较新鲜的月幔物质暴露出来。



图 2 冯·卡门区域地质图 Fig. 2 Geological map of the Von Kármán region

相对于智海和阿波罗盆地,冯·卡门撞击坑远离月 陆地区,更接近SPA盆地中部。且该撞击坑规模较小, 分布有较新的玄武岩。从这个角度考虑,冯·卡门撞击 坑将是探测和研究深部月壳及月幔物质的理想区域。

基于双层壳幔深度模型和Kaguya地形数据,Snape 等估算了SPA盆地的月壳厚度^[15,20]。结合尺度关系^[21], Snape等计算了SPA盆地的撞击熔融物质深度和中央峰 的源深度^[15],其研究结果表明,冯·卡门撞击事件形成 的熔融物质很可能代表了全部月壳,并且隆起物质中 提示了壳幔边界信息。因此,在冯·卡门撞击坑着陆探 测更有可能获得如下科学发现:原始斜长岩月壳、克 里普岩等行星分异产物的信息;峰环或坑壁以及溅射 物中可能暴露下月壳甚至月幔的物质;南部、北部玄 武岩成分、年龄的差异以及其在月海火成演化研究中 的意义;对于月球的火山活动和热演化历史研究的参 考意义。

2 地形结构特征

结合LRO卫星LOLA数据、Clementine卫星UV-VIS数据、"嫦娥2号"卫星CELMS数据、GRAIL数据 等,系统分析了冯·卡门撞击坑的地形、成分、温度和 深部结构等特征。

2.1 地 形

地形是"嫦娥4号"着陆和探测的首要考虑因素之一。基于LRO(Lunar Reconnaissance Orbiter)卫星LOLA数据,初步分析了冯·卡门撞击坑的地形特征(图3)。总体上,撞击坑盆地东西向约为200 km,南北向约为160 km,总面积约为37 594.5 km²。盆地比东部地区低约4 km,比南部地区低约2.5 km。内部的最高点高程约为-4 323.8 m,在(175.9°E,44.5°S)处,位于中央峰上。最低点约为-6621.3 m,在(174.9°E,44.3°S)点处,位于撞击坑底部北部撞击坑内,撞击坑底部的平均高程约为-5 852.0 m。

在撞击坑底部,最南部的平均海拔最低,平均海拔约为-5963.4 m。该地区地形起伏不大,撞击坑数量少,表明该地区年龄较新。撞击坑中部、东部和北部大部分地区的平均海拔约为-5848.4 m,相对于南部区域有较大的高程值。其中,整个北部地形较为复杂,存在多个较大的撞击坑,表明该地区年龄较老。与Haruyama等的研究结果相一致¹⁶。

中央峰长约45.5 km,宽约13.7 km,面积800.75 km², 高程最大值为-4 324 m,最小高程值为 -5 835 m, 平均高出南边底部区域约650 m。中央峰有部分的缺 失,分为明显的东部和西部,两部分的地形特征相差 较大。

冯·卡门撞击坑边缘不规则,仅东南边缘保存较为 完整。东北边缘退化严重,表明该地区受Leibnitz和 Finsen撞击事件影响较大。西部边缘存在独特的地貌 结构特征。Snape等认为西部地区是一个火山穹窿,并 将该地区作为冯·卡门撞击坑的首先着陆区,可以采集 到侵入或喷出的玄武岩样本^[15]。但结合三维模型和地 形剖面,该地区的地形隆起与撞击坑边缘连接,由边 缘向撞击坑中心高程表现为连续缓慢降低,呈重力滑 坡地貌特征,而不是岩体侵入特征。另外,该滑坡体 造成巨量的边坡物质进入盆地内部,深入盆地达60 km, 表明这是月表地貌演化的一种新形式,有必要结合着 陆探测和相关模型,对造成该地区地貌退化的原因做 深入研究。

冯·卡门撞击坑以南存在较大且明显的撞击坑边 缘,显示在冯·卡门撞击坑形成前该区域已经存在一个 更大的撞击坑。结合撞击坑形成模型^[22],这里很可能 采集到全部月壳岩石样本和壳幔边界物质样本,这也再 次证实了冯·卡门撞击坑着陆和巡视勘察的科学价值。



图 3 冯·卡门撞击坑高程图和底部高程图 Fig. 3 Elevation maps of the Von Kármán crater and its floor

2.2 成 分

有关SPA盆地的物质成分分布,以及盆地的形成和 演化一直以来都是科学界研究的热点和争论的焦点^[4-7]。 SPA具有相对较低的反照率,且FeO、TiO₂、Th和 Mg含量与月表其它地区明显不同^[23-30]。

Clementine卫星紫外/可见光(UV/VIS)相机(波 谱范围为0.4~1 μm,空间分辨率为100~300 m)广泛 应用于月表FeO和TiO₂的含量估算^[31-34]。本研究基于改 进的Lucey模型^[35],反演了冯·卡门撞击坑的(FeO+TiO₂)(FTA)含量(图4)。

图 4表明,总体上,冯·卡门撞击坑内部的FTA含 量明显高于撞击坑外围。在冯·卡门撞击坑内部,FTA 含量主要分布在12~25 wt.%,局部可达到27 wt.%左 右,但是,FTA含量的空间分布非常不均匀。南部的 高FTA中心及其周围的中等FTA区域,中部较连续的 中值FTA区域和北部连续性很差的中值FTA区域。其 它区域的FTA含量相对较低,且呈现一定的方向性, 很可能是受东北部撞击坑溅射物的影响。



图 4 冯·卡门撞击坑(FeO+TiO₂)含量图 Fig. 4 (FeO+TiO₂) abundance map of the Von Kármán crater

南部,以撞击坑(176.13°E, 45.41°S)位置为中 心,出现FTA含量最高值区域。同时,在撞击坑 (176.00°E, 46.81°S) (176.96°E, 46.19°S) (177.26°E, 46.26°S) (177.29°E, 46.61°S) (177.54°E, 46.36°S) 以及北部的 (174.82°E, 44.97°S)、(174.81°E, 44.28°S)位置,都再次出现 了高FTA值,其周围也呈现较高的FTA值分布。尤其 是撞击坑(176.13℃, 45.41°S)位置直径最大,达3.8 km, 周围高FTA区域半径达10.9 km。高的FTA含量与撞击 坑的密切关系表明,该地区表层覆盖有一层FTA值很 低的物质,而下层很可能存在FTA值非常高的物质, 正是撞击事件将下层高FTA值的物质挖掘并散布表 层。根据玄武岩成分与年龄的关系[36],年代越晚的玄 武岩FTA值越高,而该地区由撞击事件揭示的FTA值 都在20 wt.%以上,表明这是年代非常新的玄武岩。因 此,对该地区玄武岩样本的探测分析将为月球的火山 活动和热演化历史研究提供重要的参考资料。

另外,FeO含量和TiO2含量反演结果表明,坑底

北部的TiO₂含量明显偏高,而FeO含量较高部分存在 于坑底南部^[9]。这种FeO含量和TiO₂含量的不一致性, 也表明了该地区岩浆活动的复杂性。

同时,撞击坑北部年龄较老^[16],但该地区玄武岩 具有较高的TiO₂含量,与Hiesinger等^[36]的研究成果相 悖。因此,这也将是月球科学研究的新内容,有必要 结合本次着陆探测进行深入细致的研究。

前人的研究结果表明,SPA盆地出露的岩石均呈 现超基性特性,主要包括斜方辉石、单斜辉石、橄榄 石、斜长石和钛铁矿^[9, 23-26, 37-38]。这些岩石可以代表 SPA盆地撞击后岩浆活动、SPA撞击熔融物质、下月 壳、后期撞击事件的溅射物等^[9, 39]。当前存在的主要争 议是该地区的岩石能否代表上月幔^[9, 38, 40-42]。Borst等^[43] 基于Clementine UV/VIS和NIR数据,在SPA盆地几乎 所有的中央峰区域都发现了苏长岩,认为SPA盆地的 物质源仅为下月壳,而非上月幔。

结合Chandrayaan M3数据的初步研究结果^[4445]表明,冯·卡门撞击坑的含钙量较高,且比周围单元有更高的橄榄石含量。

总的来说,冯·卡门撞击坑的着陆和就位探测,有 望填补深层月壳及上月幔研究的空白,取得对月球早 期演化历史和月球撞击演化历史的新认识。

2.3 温度结构特征

"嫦娥"卫星微波辐射计数据对月壤成分和温度非 常敏感^[31-33,46-47]。基于"嫦娥2号"卫星微波辐射计数据, 分析了冯·卡门撞击坑的亮温特征(图 5)。

根据Stuart-Alexander的解译成果,冯·卡门撞击坑 的地质单元较为单一,中部为雨海纪玄武岩。图 5表 明,该地区月壤的微波辐射情况较为复杂。正午时 刻,3 GHz图像上,在撞击坑内的北部出现最高亮温 值,呈北东向展布。在撞击坑底南部,亮温明显较北 部低4 K左右,与撞击坑附近物质的亮温接近。在37 GHz, 北部的高亮温区域变化不大,而南部亮温增加很快, 比撞击坑附近物质的亮温高10 K以上。这表明了撞击 坑底部的北部和南部的物质成分随深度的变化存在较 大差异。午夜时刻的亮温表现与正午时刻出现了明显 差异。北部,正午时刻的高亮温区域仍然表现为高亮 温;而在南部,则出现明显的以(176.13°E,45.41°S) 为中心的低亮温区域。这表明,冯·卡门撞击坑物质成 分的空间分布是不均匀的,同时该区域月壤成分是随 深度变化的。



图 5 冯·卡门撞击坑亮温分布图 Fig. 5 Brightness temperature distribution of the Von Kármán crater

同时,在撞击坑北部,正午和午夜的亮温都比较高。Meng等在东海地区也发现了相同的情况,并推测 其成因很可能是下垫面温度较高^[48]。因此,建议将冯· 卡门北部作为第1着陆预选区,高的下垫面温度将为月 球热演化研究提供新的重要参考。

2.4 深部结构特征

深部月壳和月幔物质结构是月球科学探测的关键问题之一,在行星壳层和深部结构研究中,多采用的重力场分析方法^[49]。Snape等^[15]利用早期日本"月亮女神号"(Kaguya)获取的地形和重力数据,认为SPA区域的月壳厚度非常薄^[34]。利用最新获取的月球Grail重力和地形等地球物理数据,综合对冯·卡门撞击坑的壳层和深部结构特征进行分析(图6)。

结果显示,冯·卡门南部边缘正的布格重力异常, 对应了非常明显的负的异常梯度信息,沿冯·卡门撞击 坑南部边缘呈现一定的线性特征分布,显示该区域可 能形成了比较明显的岩墙,长度接近180 km。因此, 在形成冯·卡门M撞击坑后有大量的岩浆向上侵入,由 此可以推测,在冯·卡门撞击坑覆盖到冯·卡门M撞击坑 后,极有可能挖掘出了深部月幔的物质,这些物质极 有可能跟后期岩浆喷发后形成的玄武岩混合,只是从 现有分辨率的矿物元素图中较难分辨出来。

冯·卡门撞击坑重复撞击到南部的冯·卡门M撞击坑 上,使该区域月壳发生了局部高温熔融,并最终冷凝 形成了致密的玄武岩月壳,且月壳厚度较薄,小于5 km。 结合重力地形得到该区域的孔隙度平均为9%,稍小于 模型1的12%的孔隙度,由此可见,该区域经过多次撞 击后,月壳发生了多次熔融,并凝结成了较为致密的 玄武岩层。

"嫦娥4号"携带的测月雷达等设备将为实现这一指 标的检测提供重要支撑。



图 6 冯·卡门区域的布格重力异常和最大布格重力梯度(http://pds-geosciences.wustl.edu/) Fig. 6 Bouguer gravity anomaly and Bouguer gravity gradient map (http://pds-geosciences.wustl.edu/)

3 可能着陆区及预期科学目标

根据研究意义和冯·卡门盆地的地形参数特征,建 议将以下3个区域设置为预选着陆区(图7),分别是 位于盆地北部的I区、接近中央峰和高FTA值的II区和 靠近南部边缘的III区。这些区域的地形较为平坦,且 表面均被玄武岩覆盖。



图 7 冯·卡门区域的预选着陆区 Fig. 7 Candidate landing sites within Von Kármán Crater

3.1 区域I的科学价值

区域I位于冯·卡门撞击坑北部,分布较老雨海纪 玄武岩。在区域内有小型隆起结构,为原冯·卡门撞击 坑残留,未完全被后期玄武岩覆盖^[16]。同时,该区域 还有多个小型撞击坑;区域东部还有一个全区最大撞 击坑。

因此,在该区域着陆可能的科学发现如下:

1)获取较老的雨海纪玄武岩样本,在北部隆起 区,获得较纯净的原始SPA盆地物质,研究月球表面 的撞击演化特征及其对月表物质成分的影响机制。

2)通过对该区域的小型撞击坑和东部大型撞击坑 溅射物采样,获得该区域玄武岩分层结构信息和下垫 面介质的物质成分信息。 3)研究该区域的亮温异常成因,改进和提高当前的月球微波辐射传输机制;如果确定该地区的高亮温 异常成因是由于高的下垫面温度,将是当前月球热演 化研究的一个突破性进展,进而结合全球性的月表微 波辐射异常,对深入分析月球的热演化历史具有重要 意义。

3.2 区域II的科学价值

区域II位于冯·卡门撞击坑中部,北部为中央峰, 西部为边缘物质滑坡体,西北部为较老的玄武岩单元, 东部为较新的玄武岩单元,且具有全区最高的FTA值。

因此,在该区域着陆具有最为重要的科学价值,包括了前述的全部的预期科学发现,如下:

1)在区域西部,为边缘滑坡体,可能采集到原始 斜长岩月壳、克里普岩等行星分异的物质样本。

2) 在区域北部的中央峰附近,可能采集到下月壳 甚至月幔的物质。

3)该地区西北部,可能采集到较老的玄武岩,东 部可能采集到较新的玄武岩,可用于确定冯·卡门撞击 坑中玄武岩的年龄(可能的SPA年龄),进而对月球 的撞击年龄进行约束。

4) 区域西北部,是高亮温异常区域,而东部是正 常亮温区;通过下垫面温度测量,研究月表热点异常 的成因机制。

3.3 区域III的科学价值

区域III位于冯·卡门撞击坑南部,该区域的填充物 为较新的玄武岩;另外,该地区存在众多小型撞击 坑,表现为高FTA含量。同时,该区域边坡保存完 整,受其它地区物质成分的影响较小。

因此,在该区域着陆可能的科学发现如下:

1) 获取较新的雨海纪玄武岩样本。

2) 对小型撞击坑采样,并结合相关设备分析该区

域的分层结构特征,对下层FTA含量较高的物质分布 进行确认。

3) 撞击坑南坡保存完整,可以进行边坡地层特征 分析,寻找并分析撞击熔融物质,取得对月表撞击演 化的新认识。

4)地形分析结果表明,在冯·卡门撞击坑形成前 该区域已经存在一个更大的撞击坑(命名为M),该 区域可能采集到原始SPA物质、M撞击坑物质和晚雨 海纪玄武岩物质。

在冯·卡门撞击坑, Snape等也提供了3个着陆区域¹⁵。 其中第2、第3候选区域与本研究中的区域II、III接 近。由于本研究引入了更多的参考数据,否定了Snape 等^[15]的第1候选区,而选定为撞击坑北部具有较老年龄 和热辐射异常的区域。相对来说,本研究所提供的候 选区域具有更高的科学价值。

4 结 论

冯·卡门撞击坑位于月球最大的撞击盆地中部,是 我国"嫦娥4号"计划的预定探测目标,这将是人类首次 在月球背面的软着陆和就位探测,其相关研究成果在 月球科学研究领域将具有划时代的重要意义。

论文系统总结了冯·卡门撞击坑的研究意义和科学 价值;结合LRO卫星LOLA数据、Clementine UV-VIS 数据、GRAIL数据、"嫦娥4号"卫星CELMS数据等, 简要分析了冯·卡门撞击坑的地形、成分、深部结构和 亮温结构等方面的最新研究发现;最后,结合这些研 究发现和前人对冯·卡门撞击坑的研究期望,系统整理 了可能着陆区及预期的科学目标。

着陆区选址和科学目标规划是一项十分重要和复杂的工作,需要科学家与工程技术人员的通力协作才能做好。同时,由于不同的科学家有不同的兴趣点,因此可能对着陆区选址和科学目标规划有不同的诉求。月球探测的任务和目标规划需要集思广益,在科学家、工程技术人员广泛参与的基础上进行决策,希望本文的研究成果能够为我国"嫦娥4号"工程的着陆区选址和科学目标规划起到抛砖引玉的作用。

致谢 本研究得到国家自然科学基金项目 (41371332,11403020)和遥感科学国家重点实验室 开放基金(Grant No. OFSLRSS201706)资助,在此表 示感谢!

参考文献

[1] 吴伟仁,王琼,唐玉华,等."嫦娥4号"月球背面软着陆任务设计[J].
 深空探测学报,2017,4(2):111-117.

WU W R, WANG Q, TANG Y H, et al. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 111-117.

- [2] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社, 2005: 68-137.
- [3] Jolliff B L. 月球新观[M].北京:地质出版社, 2012.
- [4] 张健, 缪秉魁, 廖庆园, 等. 月球南极艾特肯盆地的地质特征: 探索月 球深部的窗口[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2011, 30(2): 234-240. ZHANG J, MIAO B K, LIAO Q Y, et al. The geological characteristics of the South Pole-Aitken Basin on the Moon: the window to explore the deep composition of the Moon[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2011, 30(2): 234-240.
- [5] KIM K J, DOHM J M, WILLIAMS J P, et al. The South Pole-Aitken basin region, Moon: GIS-based geologic investigation using Kaguya elemental information[J]. Advances in Space Research, 2012, 50(12): 1629-1637.
- [6] DAVID A K, DANIEL D D. A global lunar landing site study to provide the scientific context for exploration of the Moon [R]. USA: LPI-JSC Center for Lunar Science and Exploration, 2012.
- [7] PASCKERT J H, HIESINGER H, BOGERT C H V D. Lunar farside volcanism in and around the South Pole-Aitken Basin[J]. Icarus, 2017, 299: 538-562.
- [8] MORIARTY D P, PIETERS C M, ISAACSON P J. Compositional heterogeneity of central peaks within the South Pole - Aitken Basin[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2013, 118(11): 2310-2322.
- [9] PIETERS C M, III J W H, GADDIS L, et al. Rock types of South Pole - Aitken basin and extent of basaltic volcanism[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2001, 106(E11): 28001-28022.
- [10] OHTAKE M, MATSUNAGA T, HARUYAMA J, et al. The global distribution of pure anorthosite on the Moon[J]. Nature, 2009, 461(7261):236-340.
- [11] KRAMER G Y, KRING D A, NAHM A L, et al. Spectral and photogeologic mapping of Schrödinger basin and implications for post-South Pole-Aitken impact deep subsurface stratigraphy[J]. Icarus, 2013, 223(1): 131-148.
- YAMAMOTO S, NAKAMURA R, MATSUNAGA T, et al. Olivinerich exposures in the South Pole-Aitken basin[J]. Icarus, 2012, 218(1): 331-344.
- [13] STUART-ALEXANDER D E. Geologic Map of the central far side of the Moon[J]. Alexander, 1978, I-1047.
- [14] JOLLIFF B L, HASKIN L A, KOROTEV R L, et al. Scientific expectations from a sample of regolith and rock fragments from the interior of the Lunar South Pole-Aitken basin[J]. Condor, 2003, 65(2): 126-153.
- [15] SNAPE J F, FAGAN A L, ENNIS M E, et al. Science-rich mission sites within South Pole-Aitken basin, part 2: Von Kármán crater[C]// Lunar and Planetary Science Conference. [S.1.]: Lunar and Planetary Science Conference, 2010.
- [16] HARUYAMA J, JOSSET J L. Long-lived volcanism on the lunar farside revealed by SELENE Terrain Camera[J]. Science, 2009, 323(5916):905-908.
- [17] 肖龙,乔乐,肖智勇,等. 月球着陆探测值得关注的主要科学问题及 着陆区选址建议[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2016,46(2):

029602.

XIAO L, QIAO L, XIAO Z Y, et al. Major scientific objectives and candidate landing sites suggested for future lunar explorations(in Chinese)[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 029602.

- [18] National Research Council. Scientific context for the exploration of the Moon: a national research council space science board study[M]. Washington D. C.: National Academies Press, 2007.
- [19] KRING D A, DURDA D D. A global lunar landing site study to provide the scientific context for exploration of the Moon[C]//LPI-JSC Center for Lunar Science and Exploration. USA: [s.n.], 2012.
- [20] WIECZOREK M A, JOLLIFF B L, KHAN A. The constitution and structure of the lunar interior[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 2006, 60: 221-364.
- [21] CINTALA M J AND GRIEVE R A F. Scaling impact melting and crater dimensions: Implications for the lunar cratering record[J]. Meteoritics & Planetary Science, 1998, 33: 889-912.
- [22] YUE Z, JOHNSON B C, MINTON D A, et al. Projectile remnants in central peaks of lunar impact craters[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(6):435-437.
- [23] LUCEY P G, TAYLOR G J, HAWKE B R, et al. FeO and TiO₂, concentrations in the South Pole-Aitken basin: Implications for mantle composition and basin formation[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 1998, 103 (E2): 3701-3708.
- [24] LUCEY P G, BLEWETT D T, HAWKE B R. Mapping the FeO and TiO₂, content of the lunar surface with multispectral imagery[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 1998, 103(E2): 3679-3699.
- [25] LUCEY P G, BLEWETT D T, JOLLIFF B L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet/visible images[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2000, 105(E8): 20297-20305.
- [26] PIETERS C M, TOMPKINS S, HEAD J W, et al. Mineralogy of the mafic anomaly in the South Pole-Aitken basin: implications for excavation of the lunar mantle[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24(15): 1903-1906.
- [27] PIETERS C M, III J W H, ISAACSON P, et al. Lunar international science coordination/calibration targets(L-ISCT)[J]. Advances in Space Research, 2008, 42(2): 248-258.
- [28] SHEVCHENKO V V, CHIKMACHEV V I, PUGACHEVA S G. Structure of the South Pole-Aitken lunar basin[J]. Solar System Research, 2007, 41(6):447-462.
- [29] TOMPKINS S, PIETERS C M. Mineralogy of the lunar crust: results from Clementine[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2015, 34(1): 25-41.
- [30] WILHELMS D E, MCCAULEY J F, TRASK N J. The geologic history of the moon, 86-600177 (BKS3) [R]. Washington : U.S. G.P.O., 1987.
- [31] 姜景山,金亚秋.中国微波探月研究[M].北京:科学出版社,2011.
- [32] ZHENG Y C, TSANG K T, CHAN K L, et al. First microwave map of the Moon with Chang'E-1 data: the role of local time in global imaging[J]. Icarus, 2012, 219(1): 194-210.

China Earth Sci, 2016, 59(7): 1498-1507.

- [34] ISHIHARA Y, GOOSSENS S, MATSUMOTO K, et al. Crustal thickness of the Moon: Implications for farside basin structures[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(19):82-90.
- [35] GILLIS J J, JOLLIFF B L, KOROTEV R L. Lunar surface geochemistry: Global concentrations of Th, K, and FeO as derived from lunar prospector and Clementine data[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2004, 68(18): 3791-3805.
- [36] HIESINGER H, III J W H, WOLF U, et al. Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2003, 108(E7).
- [37] JOLLIFF B L, GILLIS J J, HASKIN L A, et al. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins[J]. J.geophys.res, 2000, 105(E2):4197-4216.
- [38] LUCEY P G. Mineral maps of the Moon[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(8): 289-291.
- [39] NAKAMURA R, MATSUNAGA T, OGAWA Y, et al. Ultramafic impact melt sheet beneath the South Pole-Aitken basin on the Moon[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(22): L22202.
- [40] WIECZOREK M A, CAHILL J T S, LUCEY P G, et al. The mantle of the Moon: exposed and sampled? [C]// Lunar and Planetary Science Conference. USA: Lunar and Planetary Science Conference, 2008: 1271.
- [41] YAMAMOTO S, NAKAMURA R, MATSUNAGA T, et al. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(8): 533-536.
- [42] YAN B, XIONG S Q, WU Y, et al. Mapping lunar global chemical composition from Chang'E-1 IIM data[J]. Planetary & Space Science, 2012, 67(1): 119-129.
- [43] BORST A M, FOING B H, DAVIES G R, et al. Surface mineralogy and stratigraphy of the lunar South Pole-Aitken basin determined from Clementine UV/VIS and NIR data[J]. Planetary & Space Science, 2012, 68(1): 76-85.
- [44] KLIMA R L, PIETERS C M, BOARDMAN J W, et al. New insights into lunar petrology: distribution and composition of prominent low-Ca pyroxene exposures as observed by the Moon Mineralogy Mapper(M3)
 [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(E6): 0-6.
- [45] WU Y Z, HEAD J W, PIETERS C M, et al. Regional geology of the Chang'e-3 landing zone[C]// Lunar and Planetary Science Conference. [S.l.]: Lunar and Planetary Science Conference, 2014: 2613.
- [46] 王振占,李芸,姜景山,等.用"嫦娥一号"卫星微波探测仪亮温反演 月壤厚度常和3He资源量评估的方法及初步结果分析[J].中国科学: 地球科学,2009,39(8):1069-1084.
 WANG Z Z, LI Y, JIANG J S, et al. Lunar surface dielectric constant, regolith thickness and helium-3 abundance distributions retrieved from

microwave brightness temperatures of CE-1 Lunar Microwave Sounder(in Chinese) [J]. Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 39(8): 1069-1084.

[47] CHAN K L, KANG T T, KONG B, et al. Lunar regolith thermal behavior revealed by Chang'E-1 microwave brightness temperature data[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2010, 295(1-2): 287-291.

- [48] MENG Z G, ZHANG J D, CAI Z C, et al. Microwave thermal emission features of Mare orientale revealed by CELMS data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(6): 2991-2998.
- [49] WIECZOREK M A. Gravity and topography of the terrestrial

planets[M]. Volume 10: Planets and Moons, 2007.

作者简介:

孟治国(1978-),男,教授,主要研究方向:微波遥感,月壤参数反演。 通信地址:吉林大学地球探测科学与技术学院(130026) 电话:(0431)88502362 E-mail:mengzg@jlu.edu.cn

Analysis About Landing Site Selection and Prospective Scientific Objectives of the Von Kármán Crater in Moon Farside

MENG Zhiguo^{1, 2, 3, 4}, LI Cui¹, PING Jinsong⁴, HUANG Qian⁵, CAI Zhanchuan³, Alexander Gusev⁶

(1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100101, China;

 Lunar and Planetary Science Laboratory, MUST- Partner Laboratory of Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, CAS, Macau 999078, China;

4. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatory, CAS, Beijing 100012, China;

5. Hubei Subsurface Multi-scale Imaging Key Laboratory, Institute of Geophysics and Geomatics, China University

of Geosciences, Wuhan 430074, China;

6. Geology Institute, Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia)

Abstract: The Von Kármán crater, inside the South Pole-Aitken basin on the lunar farside, is initially selected as the landing area for Chinese Chang'E-4 mission. The in-situ exploration in the crater will reveal some essential problems about the formation and evolution of the Moon, which will be of great significance in the current Moon research. The geologic significances and scientific values of the Von Kármán crater are summarized. Thereafter, the distributions of topography, composition, deep structure, and temperature brightness of the Von Kármán crater are analyzed with LRO satellite LOLA data, Clementine UV-VIS data, GRAIL data, and Chang'E-2 CELMS data and their scientific meanings are also presented. Finally, combined with our results and the previous prospects about theVon Kármán crater, three candidate landing sites and the possible scientific discoveries are proposed.

Key words: Chang'e-4 mission; Von Kármán crater; landing site selection; scientific significances

High lights:

- The geologic significances and scientific values of the Von Kármán crater are summarized.
- The distributions of topography, composition, deep structure, and brightness temperature of the Von Kármán crater are analyzed.
- Three candidate landing sites are proposed, and the detection significances of each region are also presented.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]